

# 高寒生态功能区生活垃圾收转运体系的 时空路径优化与弹性调适 ——基于改进蚁群算法的仿真应用

周侃<sup>1,2</sup>, 滕鹤郅<sup>1,3,4</sup>, 毛旭锋<sup>5</sup>

- (1. 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;  
4. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074;  
5. 青海师范大学地理科学学院/高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016)

**摘要:**居民生活垃圾排放是高寒生态功能区内自然生态系统面临的主要威胁,但现行生活垃圾治理模式的收转运体系薄弱且难以适应城乡聚落分散性及当地居民产污特性,亟待基于时空路径优化与弹性调适形成高寒生态功能区零胁迫、均等化、低成本收转运体系。论文以藏东南高原边缘森林生态功能区内米林县为例,在居民逐日生活垃圾的产生量调查及收转运规模估算基础上,采用改进蚁群算法仿真模拟收转运体系的最优时空路径与弹性管理模式。结果表明:①米林县城镇居民、农民和牧民的生活垃圾日产量依次为1.60、0.48、0.25 kg/(人·d),现行“村收集、镇转运、县处理”体系在高寒生态功能区呈现低治理效率、高经济成本与高环境风险特点;②改进蚁群算法可有效优化生活垃圾收转运路径,结合居民生活垃圾产生量进行收转运周期的动态调整,将显著提升高寒生态功能区收转运体系的运输效率并降低综合成本,时空优化后米林县生活垃圾收转运体系的总运输里程较优化前进一步减少28.53%、经济成本降低10.45%;③在最优时空路径下以就地分类、峰值响应、周期调节、风险管控为重点,强化高寒生态功能区生活垃圾收转运体系的弹性调适及风险应对。研究结果明晰了县域生活垃圾收转运体系的时空优化及适应性管理方案,可为生态功能区内人居环境质量整治与环境风险防范提供参考。

**关键词:**生活垃圾;改进蚁群算法;时空路径优化;弹性管理;高寒生态功能区

生活垃圾是城乡居民消费与日常生活中产生的固体废弃物<sup>[1]</sup>。若生活垃圾收转运及处理不及时,会造成人居环境品质下降,影响居民身体健康<sup>[2]</sup>,非正规垃圾堆放还会导致土壤、地表水、地下水和大气环境污染并对生态环境造成不利影响<sup>[3-4]</sup>。因此,生活垃圾治理成为新时期城乡人居环境整治和生态环境保护修复的重要内容<sup>[5-7]</sup>。然而,在青藏高原等高寒生态功能区内,由于城乡聚落分布的分散性

及当地居民区别于平原城镇与乡村人口的产污特征<sup>[8-9]</sup>,导致现行“村收集、镇(乡)转运、县处理”治理体系及属地管理模式下村镇层面生活垃圾处理设施建设相对滞后<sup>[10-13]</sup>,以县城为中心的生活垃圾处理收转运体系对偏远农牧民聚落的辐射带动力弱。此外,农民与牧民定居点垃圾处理的运维资金成本高、保障度低,存在设施运维能力偏低、适用高寒气候条件的处置技术和管理能力薄弱等问题<sup>[9,14]</sup>。

收稿日期:2023-01-11;修订日期:2023-04-30。

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0406);国家自然科学基金项目(42230510,42371182);中国科学院战略性先导科技专项(XDA23020101)。[Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No. 2019QZKK0406; National Natural Science Foundation of China, No. 42230510 and 42371182; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA23020101.]

第一作者简介:周侃(1986—),男,云南丽江人,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为资源环境承载力与国土空间治理。E-mail: zhoukan@igsnr.ac.cn

引用格式:周侃,滕鹤郅,毛旭锋. 高寒生态功能区生活垃圾收转运体系的时空路径优化与弹性调适: 基于改进蚁群算法的仿真应用[J]. 地理科学进展, 2023, 42(10): 1933-1946. [Zhou Kan, Teng Hezhi, Mao Xufeng. Optimization and adaptation of the spatiotemporal arrangements of routes of domestic waste collection and transfer system in the alpine ecological functional zone: Simulation modeling based on an improved ant colony algorithm. Progress in Geography, 2023, 42(10): 1933-1946.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.10.006

随着当地人口规模增长及生活消费水平提升,生活垃圾产生量增加迅速<sup>[15-16]</sup>,居民生活垃圾排放已经成为高寒生态功能区内生态系统面临的主要威胁。

显然,从环境效益、经济效益和社会效益综合目标权衡,探索适应高寒生态功能区生活垃圾治理的科学方案及优化途径,不仅能有效改善人居环境质量,还对生态功能区环境风险防范与生态安全保障具有重要意义<sup>[17]</sup>。其中,城乡居民生活垃圾收转运体系的设施空间布局和转运路径优化是生活垃圾治理研究的重点问题<sup>[18-22]</sup>。前者以城市建成区内部收转运体系为对象,通过生活垃圾处理设施空间布局调整研究削减生活垃圾治理成本<sup>[23]</sup>,并从综合社会学<sup>[24]</sup>、工程学<sup>[25]</sup>、环境学<sup>[26-27]</sup>等学科视角,采用圆心域法<sup>[28]</sup>、重心法<sup>[29]</sup>、中心转移算法<sup>[30-31]</sup>等模型算法,探索更高效的城市建成区生活垃圾治理模式。在转运路径优化研究方面,Chang等<sup>[32]</sup>将混合整数方法应用于固体废物的管理与收集车辆的路径优化,刘桐武等<sup>[33]</sup>采用最小元素法和位势法求解线性规划模型,仿真模拟了缩减行驶路程、降低运输费用的较优生活垃圾收运路径。除上述运筹学模型方法外,时空路径优化算法还包括加权法<sup>[34]</sup>、遗传算法<sup>[35]</sup>、神经网络算法<sup>[36]</sup>、考虑容量限制的弧路径优化问题(CARP)求解模型<sup>[37-38]</sup>等。不难看出,既有研究将降低复杂路况下的垃圾收运成本、避免城市建成区人居环境的负面影响作为生活垃圾收转运体系优化的主导目标<sup>[39]</sup>,亟待面向生态功能主导地域深入解析兼顾环境—经济—社会效益的全周期收转运体系优化路径。尤其是在青藏高原等高寒生态功能区内,建成区规模小、当地农牧民及城乡聚落的地理分布更加分散,除考虑生活垃圾收转运路线

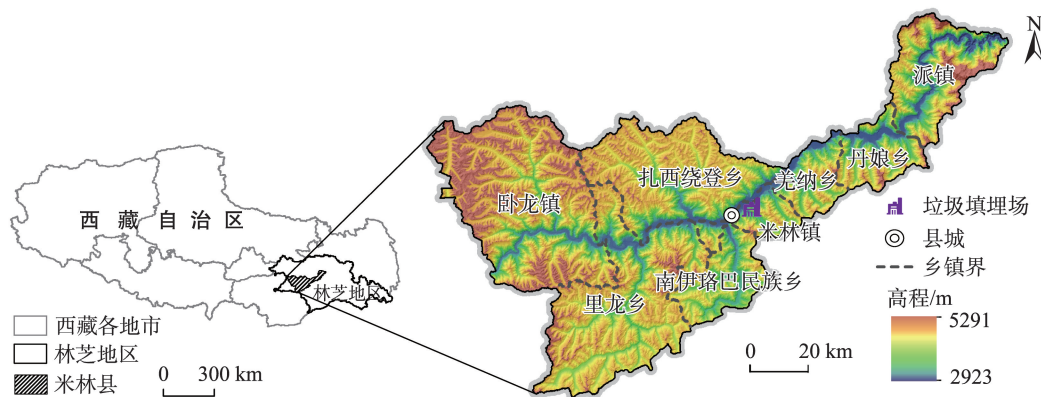
距离外,还应纳入生态胁迫<sup>[40]</sup>、生活习惯<sup>[41-42]</sup>、垃圾组分及特性<sup>[8,43-44]</sup>等因素对经济成本和环境效益的影响,加强针对生态功能主导地域内离散型聚落的生活垃圾收转运体系情景模拟,并基于时空路径优化与弹性调适构建一种适应高寒生态功能区的零胁迫、均等化、低成本收转运体系。

因此,本文选取藏东南高原边缘森林生态功能区内米林县作为典型区域,在当地居民逐日生活垃圾产生量调查及生活垃圾收转运规模估算的基础上,采用改进蚁群算法仿真模拟收转运体系时空路径,结合GIS空间分析提出路径规划与弹性管理模式,并根据区域生态保护重要性分布结果,对优化后时空路径的潜在生态安全风险进行分级评估并制定风险管控策略,进一步提出最优时空路径下的高寒生态功能区收转运体系弹性调适重点,以期高寒生态功能区居民生活垃圾处理设施配置与生态环境治理提供科学参考。

## 1 研究区域、数据与方法

### 1.1 案例区选取与数据来源

米林县位于 $93^{\circ}7'41''\sim 95^{\circ}12'24''\text{E}$ 、 $28^{\circ}39'16''\sim 29^{\circ}20'19''\text{N}$ ,总面积约为 $9500\text{ km}^2$ ,地处雅鲁藏布江中下游,平均海拔 $3700\text{ m}$ ,高山峡谷与河谷地貌交错分布,县域区位、范围及地形地貌如图1所示。米林县作为国家重点生态功能区,是青藏高原生态屏障区的重要组成部分,其生物多样性保护、调节气候、水源涵养、保持水土、调控水体等生态服务功能突出,但该县受亚热带、温带、寒带并存的立体气候类型控制,生态系统结构和功能抗干扰性弱,生态



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4307号的标准地图制作,底图无修改。

图1 研究区位置、范围及高程示意图

Fig.1 Location, spatial coverage, and elevation of the study area

系统敏感而脆弱。全县辖5乡3镇67个行政村,城乡聚落主要分布于雅鲁藏布江谷地及支流沿岸。2020年全县常住人口2.6万人,城镇居民和农牧民分别占26.9%和73.1%,主要有藏、汉、羌、珞巴族等9个民族,县域人口密度低、城乡聚落分散。米林县现行生活垃圾收转运体系采用“村收集、镇转运、县处理”及属地管理的一般模式,即以县城的末端处理设施为中心建立“二级转运”系统,通过垃圾车在城乡聚落的垃圾投放点间一次运输至乡镇垃圾转运站,再经乡镇二次运输至县城生活垃圾填埋场集中处理,生活垃圾填埋场设计库容8.4万 $\text{m}^3$ ,设计服务年限为15年,日处理量为11 t。

本文涉及数据主要包括以下3类:①地理要素数据,包括数字高程模型(digital elevation model, DEM)、土地利用图、行政区划图。DEM数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),栅格数据精度为30 m $\times$ 30 m;土地利用数据来源于中国科学院资源科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);行政区划数据来源于行政区划边界数据来自中国1:400万基础地理要素数据集(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),包括县、乡镇及行政村界线。②社会经济与人口数据,包括旅游人口、城乡常住人口等,来源于当地文化旅游、城市管理、生态环境等部门。③生活垃圾转运设施运行与交通路网数据,包括垃圾填埋场及附属设施与各级道路,主要来自当地政府部门与国家基础地理信息数据统计。此外,作者于2020年8月、2022年7月先后前往米林县进行入户访谈与实地考察,搜集统计数据及图件数据中缺失部分并补充校核。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 居民生活垃圾调查及收转运规模估算方法

现有生活垃圾估算主要采用随机抽样法<sup>[11-12]</sup>、采样法<sup>[9]</sup>、文献查阅法<sup>[45-47]</sup>等方法,但因这些方法分类类型与精度难以统一,且由于高寒生态功能区居民生产生活的特殊性,导致适用性不强。故参考《生活垃圾产生量计算及预测方法(CJ/T106—2016)》<sup>[48]</sup>及米林县2020年逐日垃圾车清运量的实地调查数据,采用改进车吨位法估算居民生活垃圾日产生量 $y_d$ ,其公式如下所示:

$$y_d = y_q \times k_s \times k_c \quad (1)$$

式中: $y_q$ 为按垃圾车吨位统计得到的生活垃圾平均日清运量(kg/d); $k_s$ 为垃圾渗沥液系数(若直运可不考虑); $k_c$ 为垃圾车的载质量利用系数,并按此测

算“村收集、镇转运、县处理”三个层级的逐日生活垃圾收转运规模。

统计调查米林县各类居民数量,按式(2)分别计算其城镇居民、农民与牧民的生活垃圾日产生量:

$$R_{dn} = y_d / S_{dn} \quad (2)$$

式中: $R_{dn}$ 为各类居民人均生活垃圾产生量(kg/(人 $\cdot$ d)), $S_{dn}$ 为各类居民常住人口数量,其中, $n=1,2,3$ (1代表城镇居民,2代表农民,3代表牧民)。

最后,结合入户调查与文献查阅,对各类居民逐日生活垃圾特性进行分析,按照成分构成将米林县居民的生活垃圾分为厨余垃圾、有害垃圾、可回收垃圾和其他垃圾并用于后续研究。

### 1.2.2 改进蚁群算法仿真模型

蚁群算法由Dorigo<sup>[49]</sup>于1991年提出,是一种用来寻找优化路径的概率型算法,其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。在研究生活垃圾收转运路径时,将垃圾车看作蚂蚁 $k$ ,根据各个节点(城乡聚落)连接路径上的信息素浓度决定其下一个访问节点,车辆收集生活垃圾的过程就相当于蚁群的觅食过程。设 $P_{ij}^k(t)$ 表示 $t$ 时刻蚂蚁从节点 $i$ 转移到节点 $j$ 的概率,其计算公式如下:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_j [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta} & j \in J_k(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau_{ij}$ 为节点 $i$ 至节点 $j$ 之间的信息素浓度; $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ 为启发函数,表示蚂蚁从节点 $i$ 转移到节点 $j$ 的期望值; $J_k(i)$ 为蚂蚁 $k$ 待访问节点的集合; $\alpha$ 为信息素重要程度因子,表示信息素浓度的重要性; $\beta$ 为启发函数重要程度因子。启发函数中 $d_{ij}$ 表示节点 $i$ 至节点 $j$ 的距离,是传统蚁群算法的计算方式,没有考虑到额外的经济成本,不利于复杂环境下规划路径,会降低蚁群算法的运行效率,容易陷入局部最优。因此,本文在计算过程中改进启发函数,将时间成本 $T_k$ 代替原路径距离 $d_{ij}$ ,综合考虑收转运过程中的额外经济成本,计算公式如下:

$$T_k = \frac{l_{ij}}{v_{ij}} \quad (4)$$

式中: $l_{ij}$ 为垃圾车从节点 $i$ 至节点 $j$ 所经道路长度, $v_{ij}$ 为垃圾车的行驶速度。

各个节点间连接路径上的信息素随着蚁群的行动逐渐释放,设参数 $\rho$ 表示信息素的挥发程度,



$1-\rho$  为信息素残留系数。当所有的蚂蚁完成一次循环后,即为垃圾车经过所有城乡聚落后,各个节点间连接路径上的信息素浓度需进行更新,计算公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}(t)$$

(5)

$$\Delta\tau_{ij}(t)=\sum_{k=1}^n\Delta\tau_{ij}^k(t)$$

(6)

式中:  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  表示  $t$  时刻第  $k$  只蚂蚁在节点  $i$  与  $j$  在连接路径上释放的信息素浓度;  $\Delta\tau_{ij}(t)$  表示  $t$  时刻所有蚂蚁在节点  $i$  至节点  $j$  连接路径上释放的信息素浓度之和。

蚂蚁信息素更新的模型包括蚁周模型、蚁量模型和蚁密模型3种,鉴于高寒生态功能区居民生活垃圾收转运需充分考虑垃圾车运行路线、聚落分布及基础设施配置,因此需要权衡效率与成本,蚁量和蚁密模型利用的是局部信息,不利于综合考虑高效率与低成本目标下的收转运路径,而改进蚁群算法因其在规避障碍、节约成本等方面具有优势,故本文选用改进蚁群算法及蚁周模型,利用全局信息进行运算。计算公式如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k=\begin{cases} \frac{Q}{T_k} & \text{第}k\text{只蚂蚁从节点}i\text{到}j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(7)

式中:  $Q$  为信息素常数,表示蚂蚁循环一次所释放

的信息素总量,取值为10~10000;  $T_k$  为第  $k$  只蚂蚁从节点  $i$  至节点  $j$  之间的时间成本。米林县改进蚁群算法仿真应用的主要变量和参数如表1所示。

2 结果分析

2.1 居民生活垃圾产生量及收转运特征解析

根据居民生活垃圾调查及垃圾特性估算结果,米林县城镇居民、农民和牧民的生活垃圾日产生量依次为1.60、0.48、0.25 kg/(人·d),县域内每日居民生活垃圾产生量合计为8.07 t/d,每日村收集、镇转运及县处理的生活垃圾依次为7.52、6.92、6.82 t/d。如表2所示,对居民生活垃圾产生量进一步分级统计发现,距县城生活垃圾填埋场30 km以上的垃圾投放点每月生活垃圾产生量为149.25 t/m,占全部垃圾产生量的61.64%,尤其是距离超过50 km的垃圾投放点日均、月均和年均产生量依次为3.81 t/d、114.30 t/m和1394.49 t/a,表明聚落分散性导致其生活垃圾收转运的路径较长。

米林县道路交通及城乡聚落生活垃圾产生量如图2所示,结合收转运各环节的实地勘察进一步发现,高寒生态功能区区内收转运体系较为薄弱,现行处理模式存在收转运效率低、集中处理成本偏高等缺陷。具体表现在:高山峡谷区的居民聚落由于

表1 蚁群算法主要变量及参数  
Tab.1 Main variables and parameters of the ant colony algorithm

名称	含义	范围	取值
蚂蚁数量 $k$	工作的垃圾车数量	—	依各聚落而定
节点 $i, j$	垃圾收集与转运点	—	依各聚落而定
信息素常量 $Q$	表示蚂蚁循环一次所释放的信息素总量	$10 \leq Q \leq 10000$	100.00
信息素因子 $\alpha$	表示信息素浓度的重要性与蚁群搜索范围	$0 \leq \alpha \leq 5$	1.00
启发函数因子 $\beta$	反映了启发式信息在指导蚂蚁搜索中的相对重要程度,蚁群寻优过程中先验性、确定性因素作用的强度	$0 \leq \beta \leq 5$	5.00
信息素挥发因子 $\rho$	反映了信息素的挥发程度,相反的 $1-\rho$ 反映了信息素的保持水平,为信息素残留系数	$0 < \rho < 1$	0.10
最大迭代次数 $T$	算法为达到最佳路径而重复计算的次数	$100 \leq T \leq 500$	200.00

表2 不同垃圾填埋场距离的当地居民生活垃圾产生量分解  
Tab.2 Decomposition of domestic waste generation at different distances from landfill sites

距县城生活垃圾填埋场/km	日均产生量/(t/d)	月均产生量/(t/m)	年均产生量/(t/a)	年产生量比重/%
≤5	0.80	23.85	290.93	9.85
(5, 10]	0.25	7.37	89.86	3.04
(10, 30]	2.05	61.64	751.99	25.47
(30, 50]	1.17	34.95	426.34	14.43
> 50	3.81	114.30	1394.49	47.21



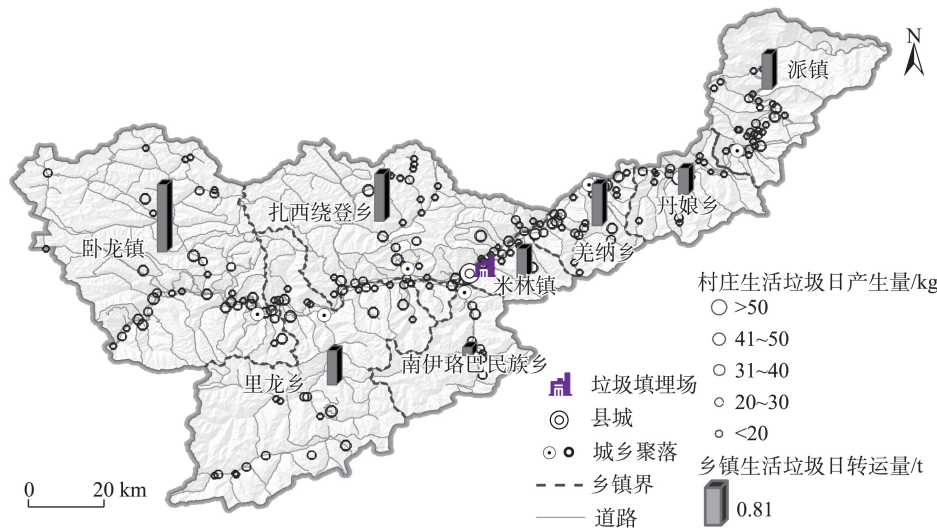


图2 米林县道路分布及城乡聚落生活垃圾产生量

Fig.2 Distribution of roads and the amount of domestic waste generated by residents of settlements in Milin County

地理位置偏远、人口规模较小,部分距离县城末端处理设施大于100 km的牧民定居点尚未纳入收转运体系,导致生活垃圾无序丢弃或露天堆放。目前全县42辆垃圾车以8次/d的清运频率进行收转运作业,主要按乡镇属地进行分片区收集,导致运输路线单一且无序,垃圾车运输效率低下。同时,由于垃圾车与收集容器之间匹配性差、缺乏运输规范、设施老化等普遍现象,使收转运路径上存在垃圾遗洒问题,对居民人居环境及高寒生态功能区的生态环境安全造成不利影响。总之,现行生活垃圾处理模式的收转运体系薄弱,亟待立足聚落分散性及当地城镇居民和农牧民产污特征,提升设施体系运维和管理能力,探索适应高寒生态功能区的零胁迫、均等化、低成本的生活垃圾收转运体系。

2.2 基于改进蚁群算法的居民生活垃圾收转运路径优化

现行生活垃圾收转运体系按照行政区划实施

属地转运,各乡镇仅对辖区内农牧民生活垃圾进行收集转运,缺乏对邻近镇域的统筹与运输路径的合理规划,导致垃圾车清洁作业效率低下。因此,采用改进蚁群算法优化居民生活垃圾收转运路径,在计算最优路径时引入时间成本,改变传统蚁群算法用路径长度代表经济成本的局限性,并由此构建新的网络数据集,充分考虑到垃圾收转运过程中基于现有路网的综合成本。模型运行后,将各节点的位置和顺序依次标记在路网中,从而得出最优生活垃圾收转运路径。将改进蚁群算法运用到米林县居民生活垃圾收转运路径优化中,突破属地转运限制,综合考虑居民点区位与综合成本,使现行“收集—转运—处理”治理模式横向延伸,统筹建立跨村域、镇域的生活垃圾收转运体系,优化配置适应其聚落分布特征的生活垃圾治理设施。改进后的米林县生活垃圾收转运体系如图3所示。

在模型运算过程中,依据各城乡聚落距垃圾填

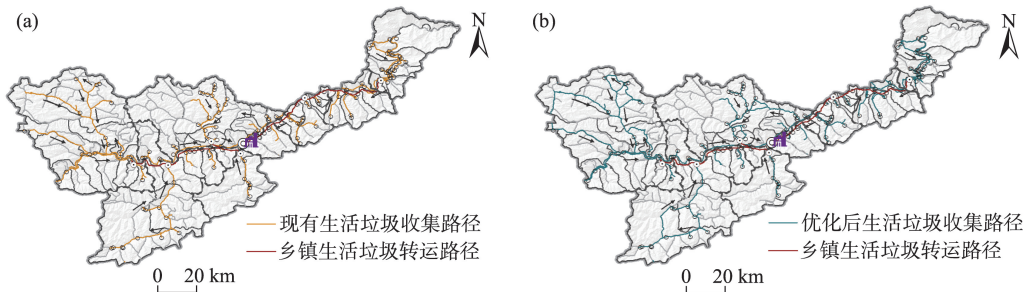


图3 生活垃圾运输路径优化前后对比

Fig.3 Comparison of domestic waste transportation routes before and after optimization

埋场的距离对其分别进行路径规划,对于与垃圾填埋场距离大于 50 km 且生活垃圾日产生量超过 2 t 的城乡聚落,每日分配集装箱式垃圾车前往作业,其余则采用普通压缩式垃圾车。并且,在运输过程中纳入邻近的城乡聚落,结合路网合理规划生活垃圾收转运顺序,减少冗余路线,缩减行驶里程与运行时间,使垃圾车的利用最大化,进一步提高收转运综合效益。

由表3对比可知,由改进蚁群算法优化后的生活垃圾收转运的路径,垃圾车的总行驶里程为 919.02 km,比现行路径缩短了 6.72%;垃圾车的发车数量也由优化前的 12 辆减少至 7 辆。同时,压缩式垃圾车和集装箱式垃圾车的平均载重分别提高了 0.39 t 和 0.47 t,每辆垃圾车平均载重提高 72.14%,减少垃圾车的作业频率可以有效节省收转运的时间。再根据每辆垃圾车的每百公里平均耗油量及每辆车平均每吨的运输费用计算出耗油量及费用,经对比发现,优化后的路径在降低能源消耗的同时节约 25.40% 的经济成本,从而减少运输过程中对生态环境带来的负担以及对人居环境造成的负面影响,兼顾了社会、经济和环境效益。并且,以“耗时”衡量收转运路径的经济成本,将限速等路况因素考虑在内,可以充分体现包括路径长度在内的人力成本及耗油量等额外经济成本,从而更利于经济成本的控制。由此表明,改进蚁群算法可有效优化生活垃圾收转运体系的运输路径,显著增强现行生活垃圾治理模式在高寒生态功能区的适配性及治理效果。

2.3 基于最优路径的居民生活垃圾收转运周期优化

调查现行收转运体系的设备配置与作业周期发现,米林县平均每辆垃圾车的单次清洁作业周期约为 30~40 min,设备多为载重 3~5 t 的压缩式垃圾车,以及 5~8 t 载重的集装箱式垃圾车,而生活垃圾的日产生量为 8.07 t/d,故在与垃圾填埋场的距离超过 100 km 的较为偏远地区,且生活垃圾收转运线路经过的城乡聚落数量较少时,可适当降低生活垃圾

的清运频率(图 4)。例如米林县西部分散分布于高山峡谷中的部分城乡聚落,每日清运的成本过于高昂且垃圾车作业效率低下。因此,考虑每 5 天左右清运一次,并且依据当月生活垃圾产生量调配合适的垃圾车前往作业;而位于雅鲁藏布江河谷及交通干线两侧的城乡聚落人口较为密集且交通便利,需每日清运,减少由于生活垃圾堆积对邻近生态系统及人居环境产生的不利影响。

根据收转运路径的途经区域及道路类型规定车辆行驶的速度区间,并分别计算出垃圾车的作业时间。通过对比发现,优化后垃圾车平均每个运输周期为 24.21 min,比优化前缩短了 34.07%;优化后垃圾车的平均每日运输里程减少了 28.53%;按照垃圾车运行过程中耗油产生的费用及人工成本估算出平均每日生活垃圾收转运的费用,周期优化后节约 10.45% 的经济成本(表 4)。同时,通过调查米林县居民生活垃圾产生量的月度变化规律发现,每年 11 月至翌年 2 月生活垃圾产生量大,月均产生量比全年平均产生量高出 31.61%,其中 1 月为居民产污高峰期;3—4 月和 9—10 月产生量则较少,月均产生量只有全年平均产生量的 68.01%,故可以适当减少垃圾车的清洁作业频率,以实现垃圾车利用的最大化。将经过改进的路径进行周期优化后,有效节省了生活垃圾收转运的时间,提高收转运效率并减少发车次数,显著节约了运行的经济成本,充分说明该周期调节与本研究的意义相符。

3 讨论

3.1 居民生活垃圾收转运路径的生态安全风险分析及分类管控策略

栅格尺度的生态保护重要性评价结果显示<sup>[50]</sup>,米林县生态保护极重要区面积为 7663.34 km<sup>2</sup>,占总面积的 80.71%,生态保护重要区面积为 1617.68 km<sup>2</sup>,占总面积的 17.04%,生态保护一般重要区面积为 213.91 km<sup>2</sup>,占总面积的 2.25%。鉴于高寒生态

表3 改进前后生活垃圾收转运路径与成本指标对比

Tab.3 Lengths of route and costs of domestic waste collection and transfer before and after improvement

车辆	现行生活垃圾运输路径					基于改进蚁群算法的最优生活垃圾运输路径				
	运输路程	平均载重	运行车数	耗油量	经济成本	运输路程	平均载重	运行车数	耗油量	经济成本
	/km	/t	/辆	/L	/元	/km	/t	/辆	/L	/元
压缩式垃圾车	300.47	0.58	5	24.80	4484.08	297.13	0.97	3	23.84	3345.12
集装箱式垃圾车	684.79	0.62	7	54.80		621.89	1.09	4	37.32	

功能区的生态保护重要性,若居民生活垃圾收集不及时,会破坏周边城乡聚落的生态环境,并威胁人居环境与健康;同时,转运过程中由于垃圾遗洒所产生的有害物质会污染水体、土壤和空气<sup>[51]</sup>,将导致重要生态功能受损加剧,故需进一步分析居民生

活垃圾收转运路径的生态安全风险,为分类管控策略制定奠定基础。对此,将生态保护重要性评价结果与优化路径进行空间叠加分析,识别收转运体系的高、较高、中与低4级潜在生态安全风险,结果如图5所示。



图4 米林县居民生活垃圾收转运路径周期优化

Fig.4 Optimization of domestic waste collection and transfer cycle in Milin County

表4 周期优化前后的生活垃圾收转运距离与成本对比

Tab.4 Comparison of domestic waste collection and transfer route lengths and costs before and after cycle optimization

对比项	每日平均运输里程/km	每辆垃圾车平均每日运输周期/min	每日生活垃圾收转运费用/元
周期优化前	986.92	36.72	3445.12
周期优化后	705.35	24.21	3085.15

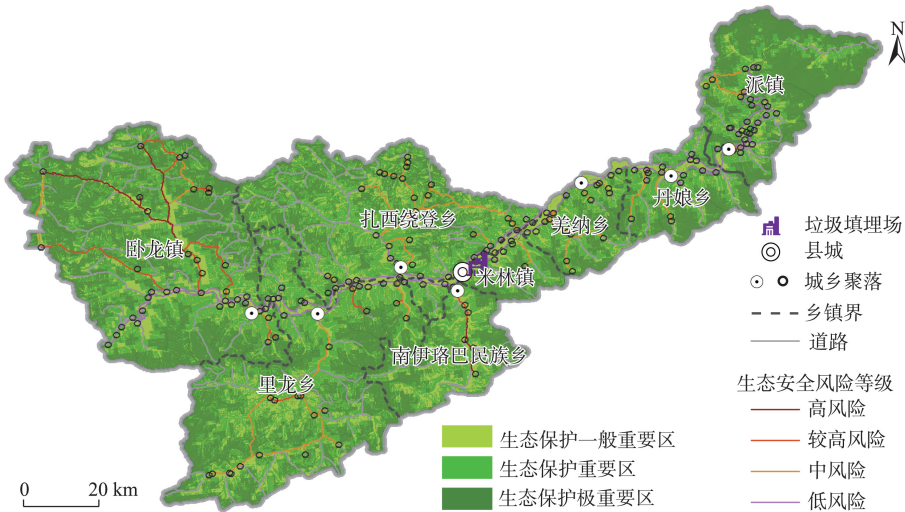


图5 基于生态保护重要性的生活垃圾收转运路径风险评价

Fig.5 Risk of domestic waste collection and transfer routes based on ecological importance



按生活垃圾收转运路径的风险等级分类制定管控策略,具体为:① 高风险路径共83.45 km,占总路径的9.10%,多经过生态保护极重要区与水源涵养区,日均收转运规模超过2 t。运输不规范会导致水土污染并危害生态环境,应适当减少垃圾车清洁作业频次,并加强垃圾车的封闭性和避免露天作业,以防止垃圾扬散或遗洒,还需将垃圾车的行驶速度控制在40 km/h以内。② 较高风险路径共127.63 km,占总路径的12.89%,日均收转运规模1~2 t,部分区域水土流失严重且土地退化,故需加强道路两侧绿化,降低交通运输对环境的胁迫,对于运输距离小于10 km且生活垃圾收集点沿运输道路分布的聚落,宜采用“直运模式”,减少由于垃圾车停留装卸垃圾过程中产生的环境问题。③ 中风险路径共332.98 km,占总路径的36.23%,多经过峡谷区及人口密集地带,日均收转运超过4 t,垃圾车收转运频次高,因此应选用集装箱式垃圾车前往作业,提高效率,同时加强垃圾收运点的管理,避免交通繁忙时装运垃圾,规范运输方式。④ 低风险路径共385.05 km,占总路径的41.68%,多分布于雅鲁藏布江两岸的干线道路,应以预防为主,尽可能远离群众日常生活聚集场所和人流密集区域。此外,还应定期保养垃圾车以及检查垃圾治理设施的配备情况,转运过程中,道路平坦地区宜选用电动收集车,道路起伏较大地区宜选用机动收集车,因地制宜降低收转运成本的同时最大限度减少对生态环境和人居环境的影响,实现环境、经济与社会效益

的协调。

### 3.2 最优时空路径下的居民生活垃圾收转运体系全周期弹性调适

米林县现行生活垃圾处理体系未在生活中垃圾充分分类的基础上进行,不及时的收转运或不规范的填埋处理,极易产生污染性强的有害垃圾废液,对水体、土壤、空气乃至人体健康产生严重危害<sup>[5]</sup>。因此,在最优时空路径下,居民生活垃圾的治理需综合考虑产生、收集、转运和处置4个环节的弹性调适。在产生源头环节,除考虑居民生活垃圾收转运外,随着自驾出游、科普研学、户外露营、徒步远足等生态旅游方式兴起,外来游客在旅游旺季的季节性涌入导致生活垃圾产生量激增,将对高寒生态功能区内收转运体系产生巨大冲击,故需要进一步强化收转运体系的峰值响应。如图6所示,米林县境内雅鲁藏布江大峡谷、南伊沟等旅游景区,全年外来游客合计36.53万人,按排放清单法实测得到的游客日均生活垃圾产生量为1.92 kg/(人·d)估算,共产生生活垃圾70130 t,其中,其中,3月和8月游客进入峰值期,生活垃圾产生量分别比平时高出90.12 t和112.73 t,故应在旅游旺季相应提高垃圾车清运频率,并且调配集装箱式垃圾车前往作业应对峰值压力。

在前端收集环节,通过加大宣传教育,逐步提高公众认识水平,增强其环境自觉与环境意识,鼓励有条件的地区遵循“减量化、资源化和无害化”的原则进行生活垃圾就地分类,其组分按照以往研究<sup>[8-9]</sup>,可

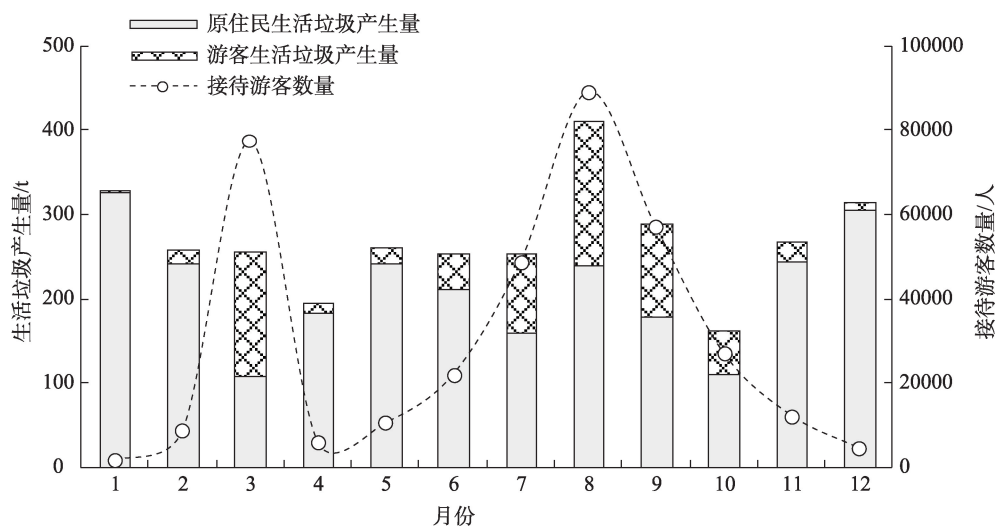


图6 2020年米林县主要景区逐月游客量及垃圾产生量

Fig.6 Monthly number of tourists and waste generation in the main tourism areas in Milin County in 2020

分为:20.45%的有机物(厨余垃圾)、31.95%的可回收垃圾(橡塑、纺织物、玻璃及金属)、1.03%的危险及有害废物以及46.57%的其他垃圾。其中,对厨余垃圾进行堆肥发酵处理,实现本地资源化利用;可回收垃圾应进行循环利用或资源回收,以减少生活垃圾处置量,降低收转运负荷,提高环境与经济效益;将有害垃圾运送至危废处理中心处置,其他垃圾则进入收转运体系。

同时,依据高寒生态功能区内的居民产污特征,每20~30户配置一处压缩式定点垃圾箱设施,以及供居民直接倾倒垃圾的小型垃圾收集转运点。中端收集和转运环节应基于一定时间和服务区域内生活垃圾产生量,综合考虑社会经济发展中的各种变动因素,对路径进行周期调节,缩短收转运距离,降低运行成本,并且依据生态保护重要性评价对收转运路径进行分级风险管控,降低生态安全风险。末端处置环节,在距县城垃圾填埋场50 km

以上的镇区增设微型处理点,并结合微生物与太阳能等清洁能源更新改进适应性更强的处理技术,减少对环境产生不良影响的同时产生一定的经济效益,同时实行面向整个高寒生态功能区的区域统筹、城乡统筹与片区集中治理模式(图7),强化高寒生态功能区生活垃圾收转运体系的弹性调适,切实改善人居环境质量、有效防范生态功能区生态环境安全风险。

4 结论

4.1 结论

(1) 米林县现有的生活垃圾收转运路径未打破聚落间行政边界的限制,导致收转运效率低下;同时,还有设施运维成本高与保障低并存的问题,导致居民的生活垃圾没有得到科学有效的治理。基于现行“村收集、镇转运、县处理”的生活垃圾治理

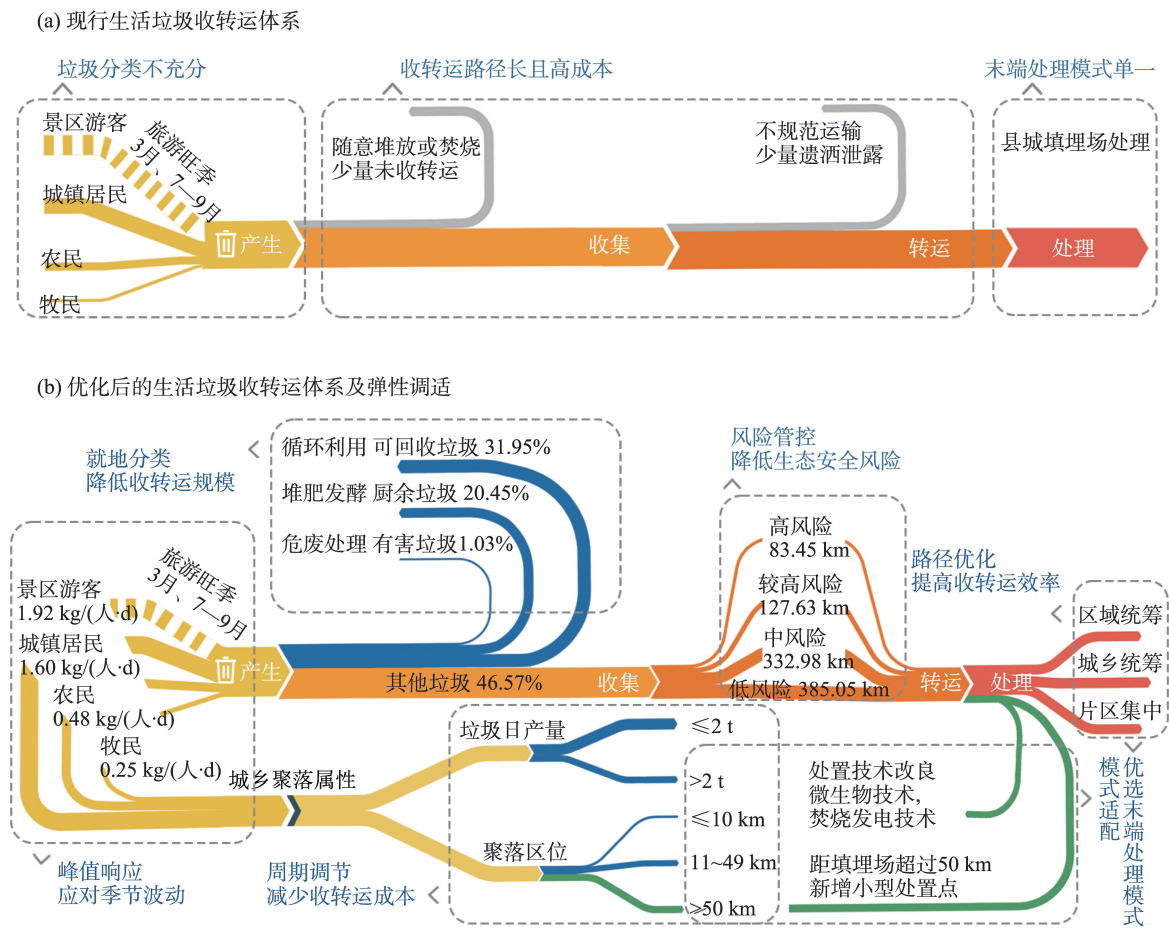


图7 高寒生态功能区居民生活垃圾收转运体系的全周期弹性调适示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the flexible management model of domestic waste collection and transfer system in the alpine ecological functional zone

体系,通过实地勘察与调研,刻画了米林县产污特征,并对居民进行分类统计:其城镇居民、农民及牧民的生活垃圾日产生量依次为1.60、0.48、0.25 kg/(人·d),县域内每日居民生活垃圾产生量合计为8.07 t/d。

(2) 改进蚁群算法可有效优化生活垃圾收转运路径,基于居民生活垃圾产生量与现有路网调整收转运路径,将显著提升高寒生态功能区收转运体系的运输效率并降低综合成本。空间路径优化后米林县生活垃圾收转运体系的总运输里程较优化前缩短6.72%,每辆垃圾车平均载重提高72.14%,同时,还节约了计入耗油量经济成本的25.40%;对优化后的收转运路径周期进行动态调节,进一步减少总运输里程的28.53%、并降低10.45%的经济成本,表明更灵活高效的时空路径优化可有效增强高寒生态功能区现行收转运体系的适应性,并实现环境效益与经济成本综合权衡。

(3) 优化后的生活垃圾收转运路径中高、较高、中、低4个风险等级依次占总路径的9.10%、12.89%、36.23%和41.68%,依据风险等级提出规范垃圾车运输行为、限制行驶速度等配套措施。面向高寒生态功能区内聚落分散性及产污特征,以就地分类、峰值响应、周期调节、风险管控、路径优化、区域统筹等环节为重点,对居民生活垃圾收转运体系进行全周期弹性调适,减少高寒生态功能区生态安全风险并维持优质人居环境质量。

#### 4.2 不足与展望

本文重点探讨高寒生态功能区居民生活垃圾收转运的时空优化路径,并已达到缩短路径、提高效率及节约成本的综合效益权衡预期。将在未来研究中进一步考虑邻近县域,并由县(区)统筹居民生活垃圾收集、转运及处理设施的运营管理工作,同时扩大生活垃圾收转运网络,实现高寒生态功能区居民生活垃圾治理的统筹规划。此外,由于调查范围和数据存在局限性,未来将在算法实施与模型构建方面,拓展假设条件,将垃圾收集点的容器容量及设施承载力纳入算法,并在大数据调查摸底的基础上,结合动态、静态数据,测算环境成本,将生活垃圾收转运对周边居民健康以及生态环境质量的影响纳入路径优化的综合成本,深化算法的应用。此外,还将逐步探索青藏高原区域统筹治理、城乡统筹治理、片区集中治理以及乡镇就地治理等差异化模式下的路径规划与弹性管

理途径,从而提出面向高寒生态功能区的生活垃圾收转运体系。

#### 参考文献(References)

- [1] 边炳鑫,赵由才. 农业固体废物的处理与综合利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 12-13. [Bian Bingxin, Zhao Youcai. Treatment and comprehensive utilization of agricultural solid waste. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 12-13.]
- [2] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制 [J]. 环境科学, 1998, 19(5): 88-92, 96. [He Chansheng, Fu Bojie, Chen Liding. Non-point source pollution control and management. Environmental Science, 1998, 19(5): 88-92, 96.]
- [3] 彭兆弟,李胜生,刘庄,等. 太湖流域跨界区农业面源污染特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 458-465. [Peng Zhaodi, Li Shengsheng, Liu Zhuang, et al. Characteristics of transboundary non-point source agricultural pollution in the Taihu Valley. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(3): 458-465.]
- [4] 王永生,刘彦随. 中国乡村生态环境污染现状及重构策略 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(5): 710-717. [Wang Yongsheng, Liu Yansui. Pollution and restructuring strategies of rural ecological environment in China. Progress in Geography, 2018, 37(5): 710-717.]
- [5] 唐丽霞,左停. 中国农村污染状况调查与分析: 来自全国141个村的数据 [J]. 中国农村观察, 2008(1): 31-38. [Tang Lixia, Zuo Ting. Survey and analysis of rural pollution in China: Data from 141 villages nationwide. China Rural Survey, 2008(1): 31-38.]
- [6] 姚伟,曲晓光,李洪兴,等. 我国农村垃圾产生量及垃圾收集处理现状 [J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(1): 10-12. [Yao Wei, Qu Xiaoguang, Li Hongxing, et al. Production, collection and treatment of garbage in rural areas in China. Journal of Environment and Health, 2009, 26(1): 10-12.]
- [7] 周侃,蔺雪芹,申玉铭,等. 京郊新农村建设人居环境质量综合评价 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(3): 361-368. [Zhou Kan, Lin Xueqin, Shen Yuming, et al. Comprehensive evaluation of human settlement quality in Beijing suburban new countryside. Progress in Geography, 2011, 30(3): 361-368.]
- [8] 旦增,韩智勇. 青藏高原地区旱季城市生活垃圾特性研究 [J]. 中国沼气, 2012, 30(6): 33-36. [Danzeng, Han Zhiyong. Analysis on the characteristics of MSW during dry season in Tibetan Plateau. China Biogas, 2012, 30(6): 33-



36. ]
- [9] 韩智勇, 旦增, 孔垂雪. 青藏高原农村固体废物处理现状与分析: 以川藏5个村为例 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 451-457. [Han Zhiyong, Dan Zeng, Kong Chuixue. Current status of solid waste disposal in rural areas of the Tibetan Plateau: A case study of five villages in the Sichuan-Tibet region. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 451-457. ]
- [10] 孙煜琛, 杨婷, 张涛, 等. 西部地区居民的生活垃圾分类参与意愿分析 [J]. 环境卫生工程, 2022, 30(1): 1-9, 16. [Sun Yuchan, Yang Ting, Zhang Tao, et al. Analysis on MSW classification participation willingness of residents in the western China. Environmental Sanitation Engineering, 2022, 30(1): 1-9, 16. ]
- [11] 聂二旗, 郑国砥, 高定, 等. 中国西部农村生活垃圾处理现状及对策分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 882-889. [Nie Erqi, Zheng Guodi, Gao Ding, et al. Status quo and strategy for management of rural domestic waste in West China. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(10): 882-889. ]
- [12] 靳琪, 岳波, 王琪, 等. 我国不同区域农村生活垃圾的产生、管理现状: 基于抽样的村镇调查研究 [J]. 环境工程, 2018, 36(10): 97-101, 107. [Jin Qi, Yue Bo, Wang Qi, et al. Present situation of production and management of rural domestic refuse in different regions of China: Based on survey of the sampled villages and towns. Environmental Engineering, 2018, 36(10): 97-101, 107. ]
- [13] 管蓓, 刘继明, 陈森. 农村生活垃圾产生特征及分类收集模式 [J]. 环境监测管理与技术, 2013, 25(3): 26-29. [Guan Bei, Liu Jiming, Chen Sen. Production and classified collection pattern of rural solid waste. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2013, 25(3): 26-29. ]
- [14] 党晓飞, 欧阳峰. 西藏城镇生活垃圾处理现状与对策: 以山南扎囊县为例 [J]. 广东农业科学, 2009(2): 88-89. [Dang Xiaofei, Ouyang Feng. The current situation and countermeasures of urban domestic waste treatment in Tibet: A case study of Zhanang County, Shannan. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(2): 88-89. ]
- [15] 黄巧云, 田雪. 生态文明建设背景下的农村环境问题及对策 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2014(2): 10-15. [Huang Qiaoyun, Tian Xue. Rural environmental problems and countermeasures under background of ecological civilization construction. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2014(2): 10-15. ]
- [16] He P J. Municipal solid waste in rural areas of developing country: Do we need special treatment mode? [J]. Waste Management, 2012, 32(7): 1289-1290.
- [17] 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1659-1696. [Chen Fahu, Fu Bojie, Xiajun, et al. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects. Science China: Earth Sciences, 2019, 49(11): 1659-1696. ]
- [18] 盛金良, 曹春华. 城市生活垃圾收运模式设计 [J]. 环境卫生工程, 2000(2): 85-87. [Sheng Jinliang, Cao Chunhua. Design of MSW (municipal solid waste) collection and transport system. Environmental Sanitation Engineering, 2000(2): 85-87. ]
- [19] 雷悦, 杨若凡, 马慧民. 垃圾收运路线问题的蜂群优化算法研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 441-444. [Lei Yue, Yang Ruofan, Ma Huimin. Study on bee colony optimization metaheuristic for the collection and transportation route of rubbish. Computer Simulation, 2014, 31(9): 441-444. ]
- [20] 刘洁, 刘丹, 何彦锋. 带中转设施的垃圾收集VRP的改进蚁群算法 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 333-339. [Liu Jie, Liu Dan, He Yanfeng. Improved ant colony system algorithm for waste collection vehicle routing problem. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(2): 333-339. ]
- [21] 朱明华, 范秀敏, 刘炳凯, 等. 上海浦东新区城市生活垃圾收运路线优化研究 [J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1612-1618. [Zhu Minghua, Fan Xiumin, Liu Bingkai, et al. Optimization of the route of municipal solid waste collection and transportation. Resources Science, 2009, 31(9): 1612-1618. ]
- [22] Sulemana A, Donkor E A, Forkuo E K, et al. Effect of optimal routing on travel distance, travel time and fuel consumption of waste collection trucks [J]. Management of Environmental Quality, 2019, 30(4): 803-832.
- [23] 黄勇, 齐童, 石亚灵, 等. 村镇生活垃圾低成本收运系统空间布局方法研究 [J]. 山地学报, 2018, 36(4): 628-643. [Huang Yong, Qi Tong, Shi Yaling, et al. Research on spatial distribution method of low-cost living waste collection and transportation system in villages and towns. Mountain Research, 2018, 36(4): 628-643. ]
- [24] Soltani A, Sadiq R, Hewage K. Selecting sustainable waste-to-energy technologies for municipal solid waste treatment: A game theory approach for group decision-

- making [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 388-399.
- [25] Evangelisti S, Tagliaferri C, Clift R, et al. Life cycle assessment of conventional and two-stage advanced energy- from- waste technologies for municipal solid waste treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 100: 212-223.
- [26] 张曼丽, 蔡洪英, 李洁, 等. 重庆市农村生活垃圾污染特征及其变化动力机制研究 [J]. *环境工程*, 2015, 33(S1): 550-553, 573. [Zhang Manli, Cai Hongying, Li Jie, et al. Research on the characteristics and dynamic mechanism of rural living garbage. *Environmental Engineering*, 2015, 33(S1): 550-553, 573. ]
- [27] 魏潇潇, 王小铭, 李蕾, 等. 1979—2016年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38 (10): 3833- 3843. [Wei Xiaoxiao, Wang Xiaoming, Li Lei, et al. Temporal and spatial characteristics of municipal solid waste generation and treatment in China from 1979 to 2016. *China Environmental Science*, 2018, 38 (10): 3833-3843. ]
- [28] 邓泉, 姜福兴, 朱斯陶, 等. 城市垃圾矿山深井废弃空间处置选址安全评价 [J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(3): 136- 141. [Deng Xiao, Jiang Fuxing, Zhu Sitao, et al. Safety evaluation of site selection of municipal waste disposal in deep mine. *Mining Research and Development*, 2021, 41(3): 136-141. ]
- [29] 曹勇锋, 荣宏伟, 张可方, 等. 结合重心法和层次分析法研究垃圾转运站选址 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35 (6): 118- 121, 129. [Cao Yongfeng, Rong Hongwei, Zhang Kefang, et al. Location selection of waste transfer station based on combining gravity method and AHP model. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35 (6): 118-121, 129. ]
- [30] 杜亚娟, 郭强. 垃圾中转站最优选址及垃圾最优转运方案研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2015(10): 252-256. [Du Yajuan, Guo Qiang. Studies of optimal location of municipal wastes transfer station and optimal transfer plan of wastes. *Computer Engineering and Applications*, 2015(10): 252-256. ]
- [31] 李妮, 李茜铭, 杨瑛. 基于人口密度的城市小型转运环卫设施空间布局研究 [J]. *经济地理*, 2013, 33(9): 73-79. [Li Ni, Li Ximing, Yang Ying. The spatial distribution research of small urban transporter sanitation based on population density. *Economic Geography*, 2013, 33 (9): 73-79. ]
- [32] Chang N B, Lu H Y, Wei Y L. GIS technology for vehicle routing and scheduling in solid waste collection systems [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(9): 901-910.
- [33] 刘桐武, 刘兆龙. 线性规划在城市垃圾运输中的应用 [J]. *环境卫生工程*, 1996(2): 22-27. [Liu Tongwu, Liu Zhaolong. The linear program was applied for the transportation of the municipal waste. *Environmental Sanitation Engineering*, 1996(2): 22-27. ]
- [34] 宋薇, 刘建国, 聂永丰. 城市生活垃圾收运路线优化研究 [J]. *环境卫生工程*, 2008(1): 11-12, 15. [Song Wei, Liu Jianguo, Nie Yongfeng. Study on route optimization for municipal domestic waste collection and transportation. *Environmental Sanitation Engineering*, 2008(1): 11-12, 15. ]
- [35] Baker B M, Ayechew M A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem [J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30: 787-800.
- [36] 贾学斌, 刘冬梅, 孙喆. 用神经元理论优化生活垃圾收运路线 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(6): 819-820, 832. [Jia Xuebin, Liu Dongmei, Sun Zhe. Application studies of nerve unit theory about routes optimization for daily rubbish carrying system. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(6): 819-820, 832. ]
- [37] Mourão M C, Almeida M T. Lower-bounding and heuristic methods for a refuse collection vehicle routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 121(2): 420-434.
- [38] Karadimas N V, Papatzelou K, Loumos V G. Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm [J]. *Waste Management & Research*, 2007, 25(2): 139-147.
- [39] 李明月, 李俐频, 左薇, 等. 基于GIS与改进蚁群算法的垃圾收运路径规划 [J]. *环境工程学报*, 2022, 16(7): 2388-2396. [Li Mingyue, Li Lipin, Zuo Wei, et al. Garbage collection and transportation path planning based on GIS and improved ant colony algorithm. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(7): 2388-2396. ]
- [40] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306. [Fu Bojie, Ouyang Zhiyun, Shi Peng, et al. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(11): 1298-1306. ]
- [41] 韩智勇, 梅自力, 孔垂雪, 等. 西南地区农村生活垃圾特征与群众环保意识 [J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31

- (3): 314-319. [Han Zhiyong, Mei Zili, Kong Chuixue, et al. Features of domestic wastes and environmental awareness of people in the rural area of southwest China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(3): 314-319. ]
- [42] 李扬, 谭全银, 董庆银, 等. 中国西北典型城市西宁生活垃圾产生及回收 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(3): 385-388, 394. [Li Yang, Tan Quanyin, Dong Qingyin, et al. Production and recycling of municipal solid waste in typical northwest city of China, Xining. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(3): 385-388, 394. ]
- [43] 旦增, 穷达卓玛, 布多, 等. 西藏旅游垃圾特性分析及处置建议 [J]. 高原科学研究, 2018, 2(3): 20-26. [Dan-zeng, Qionгда Zhuoma, Buduo, et al. Characteristic analysis of tourism waste in Tibet and its disposal suggestion. *Plateau Science Research*, 2018, 2(3): 20-26. ]
- [44] 韩智勇, 费勇强, 刘丹, 等. 中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 1-14. [Han Zhiyong, Fei Yongqiang, Liu Dan, et al. Yield and physical characteristics analysis of domestic waste in rural areas of China and its disposal proposal. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(15): 1-14. ]
- [45] 王俊起, 王友斌, 李筱翠, 等. 乡镇生活垃圾与生活污水排放及处理现状 [J]. 中国卫生工程学, 2004(4): 12-15. [Wang Junqi, Wang Youbin, Li Xiaocui, et al. Discharge & disposal status on domestic garbage and sewage in countrysides. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2004(4): 12-15. ]
- [46] 何品晶, 张春燕, 杨娜, 等. 我国村镇生活垃圾处理现状与技术路线探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2049-2054. [He Pinjing, Zhang Chunyan, Yang Na, et al. Present situation and technical treatment route of rural domestic waste treatment in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2049-2054. ]
- [47] 聂永丰. 我国生活垃圾处理技术现状及发展方向探讨 [J]. 环境经济, 2005(10): 30-35, 8. [Nie Yongfeng. Present situation of our country's domestic waste treatment technology and discussion on the development direction. *Environmental Economy*, 2005(10): 30-35, 8. ]
- [48] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾生产量计算及预测方法 (CJ\_T106—2016) [S]. 2016-12-01. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Calculation and forecasting methods for municipal solid waste production quantity (CJ\_T106—2016). 2016-12-01. ]
- [49] Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms [D]. Milano, Italy: Polytechnic University of Milan, 1992.
- [50] 吴浩, 安鹤轩, 宋小燕, 等. 林芝市生态保护重要性评价与生态功能区划 [J]. 科技促进发展, 2022, 18(5): 686-695. [Wu Hao, An Hexuan, Song Xiaoyan, et al. Importance evaluation of ecological protection and ecological function zoning in Nyingchi City. *Science & Technology for Development*, 2022, 18(5): 686-695. ]
- [51] 谷中原, 谭国志. 农村垃圾治理研究: 以武陵山区S县L乡为例 [J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2009, 10(1): 34-39. [Gu Zhongyuan, Tan Guozhi. A research on management of rural garbage: A case study of L Village in Wuling Mountains area. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences)*, 2009, 10(1): 34-39. ]



# Optimization and adaptation of the spatiotemporal arrangements of routes of domestic waste collection and transfer system in the alpine ecological functional zone: Simulation modeling based on an improved ant colony algorithm

ZHOU Kan<sup>1,2</sup>, TENG Hezhi<sup>1,3,4</sup>, MAO Xufeng<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 4. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 5. Academy of Plateau Science and Sustainability, School of Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China)

**Abstract:** The main threat to the natural ecosystem in the alpine ecological functional zone is the discharge of domestic waste from residential areas. However, the waste collection and transfer system of the current domestic waste management model is weak and unable to adapt to the decentralized nature of urban and rural settlements and waste generation characteristics, and it is critical to form a zero-threat, equal, and low-cost waste collection and transfer system in the alpine ecological functional zone based on spatiotemporal route optimization and flexible adaptation. In this study, an improved ant colony algorithm was used to simulate the optimal spatiotemporal route arrangements and develop a flexible management model of the waste collection and transfer system, which was based on a survey of daily domestic waste generation and the estimation of collection and transfer scale in Milin County, a forested area on the southeastern edge of the Tibetan Plateau. The results show that: 1) The daily generation of domestic waste in Milin County is 1.60, 0.48, and 0.25 kg/d per capita, respectively, for urban residents, farmers, and herders; and the current "collection by village, transfer by town, and treatment by county" system in the alpine ecological functional zone shows the characteristics of low treatment efficiency, high economic costs, and high environmental risk. 2) The improved ant colony algorithm can effectively optimize the transportation route of the domestic waste collection and transfer system while dynamically adjusting the collection and transfer cycle by considering the amount of residents' domestic waste generation, which will significantly improve the transportation efficiency and reduce the cost of the domestic waste collection and transfer system in the alpine ecological functional zone. The total distance of domestic waste transport after the spatiotemporal optimization of routes is 28.53% less than before, and the economic cost is 10.45% lower. 3) The flexible adaptation capacity and response to risks of the domestic waste collection and transfer systems in the alpine ecological functional zone should be strengthened under the optimal spatiotemporal route, with emphasis on on-site classification, peak response, cycle regulation, and risk control. The results of the study clarified the spatial and temporal optimization and adaptive management scheme of the domestic waste collection and transport system in the county area, which can provide a reference for the improvement of the human settlement environment and prevention of environmental risks in the ecological functional zone.

**Keywords:** domestic waste; ant colony algorithm; spatiotemporal optimization of routes; flexible management; alpine ecological functional zone